Technical Note

超高速伝送技術動向とその課題

「100 GbE/40 GbE および光位相変調による長距離伝送実現にむけて」

MP1800A

シグナル クオリティ アナライザ

超高速伝送技術動向とその課題

1. 市場動向

FTTx をはじめ、ブロードバンド環境は、日々普及の一途を辿っています。そのような中、コアネットワークでは、10Gbps から 40Gbps への本格的な移行が始まりました。特に、インターネットエクスチェンジ(IX) – インターネットサービスプロバイダ(ISP)間ではトラフィックが集中し、一日の IX のトラフィックが日本(JPIX)では 100Gbps, 世界最大のアムステルダム(AMSIX)では 400Gbps を超える状況になっています。

このようなコアネットワークの窮状を解決すべく、IEEEは2006年7月、HSSG(High Speed Study Group)として100GbE規格検討を開始、2010年6月の規格化を目指しIEEE802.3baとして2007年11月に活動を開始しました。この中では、IX, ISP, CSP(Contents Service Provider)間を接続する100GbE及び、Data Center内, Data Center内のサーバ間等を接続する40GbEの規格化が検討されています。また、これら100GbE/40GbEによるLAN系の規格だけでなく、それらを長距離伝送するためのWAN系の規格がOTN((Optical Transport Unit:: OTU3, OTU4)としてITU-T SG15において議論されています。既に商用化されているSDH/SONET/OTN等による40Gbps長距離伝送、特に海底ケーブルでは効率的な伝送方式の実現方法について、本格的な研究, 開発, 導入が始まっています。

本稿では、最近の技術動向について解説するとともに、測定器メーカの立場から、必要とされる測定項目について記載します。

2. 規格化動向

2.1 IEEE による 40GbE / 100GbE 規格化動向

IEEE802.3ba では 100GbE / 40GbE を実現するための方式が議論されています。100GbE は主に IX 内および IX-ISP 間を接続することを目的としたもので、100GbE までのバンド幅を必要としないサーバやストレージの内部接続や機器間接続に関しては、40GbE の適応が検討されています。以下に現在審議されている構成を示します。

40GbE　at least 10km on SMF
at least 100m on OM3 MMF
at least 10m on over a copper cable assembly
at least 1m over a backplane

100GbE　at least 40km on SMF
at least 10km on SMF
at least 100m on OM3 MMF
at least 10m over a copper cable assembly

また、40GbE/100GbE の階層としては以下のものが 802.3ab Draft1.0 に記載されています。

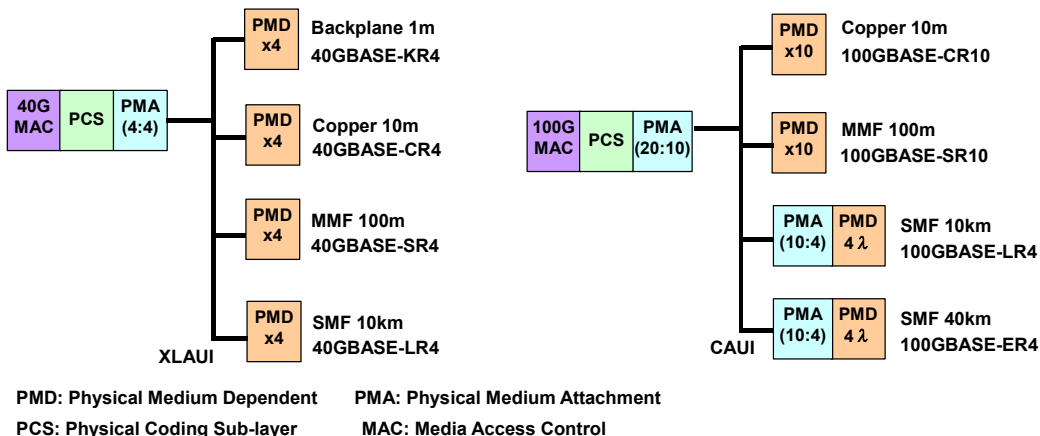



図 1. 40GbE / 100GbE 形態

上記から、PMD とネットワーク側とを接続する MDI(Medium Dependent Interface)は、40GbE では 10Gbps x 4 パラレル伝送が、100GbE では 10Gbps パラレル, 25G パラレルがそれぞれ議論されています。また、PMD と PMA 間のインタフェースは、40GbE では XLAUI と呼ばれる 10Gbps x 4lane, 100GbE では CAUI と呼ばれる 10Gbps x 10lane となります。さらに 100GBASE-LR4 や 100GBASE-ER4 で使用される光モジュール部は CFP (100G Form-factor Pluggable)として MSA(Multi Source Agreement)化されていく予定です。

2.2 ITU-T, OIF 及び 40G 長距離化動向

100GbE や 40GbE は、LAN 側の規格として IEEE で決定されますが、ITU-T もその動きと連携して WAN 側の OTU4 に 40GbE や 100GbE をカプセル化していくことが議論されています。'08 年 9 月末 ITU-T SG15/Q11 中間会合で OTU4 のビットレートとして 111.89973Gbit/s が選択されました。

また、それらの動きと連動しながら、OIF(Optical Internetworking Forum)でも 2009 年末を目標に 100Gbps 超の伝送を実現する方法として位相変調の一つ DP-QPSK(Dual Polarization – Quadrature Phase Shift Keying.)を採用した 100G long distance DWDM transmission Implementation Agreement (OIF 2008.125.04)の取りまとめが行われています。(DP-QPSK は、Dual Polarization の代わりに Polarization Multiplexing の略で PM-QPSK と呼ばれることもあります。)

すでに、コアネットワークの一部は、40Gbps 伝送が商用敷設されていますが、広く普及しているのは 10Gbps や 2.5Gbps が主流です。2000 年ごろ、通信ベンダやキャリアは、40Gbps 以上の高バンド幅を効率的に実現するため、2.5Gbps や 10Gbps WDM あるいは 40Gbps シリアル伝送による長距離化の実験を行っていました。現実的には、PMD, CD, ファイバの非線形性といった技術的課題と共に、それらを克服するための経済的課題から、現在に至っています。しかしながら、昨今 10GbE の爆発的な普及により、IX, ISP 間のトラフィックが増加しているのと同様に、コアネットワークの長距離トラフィックも本格的な 40Gbps 対応を迫られています。

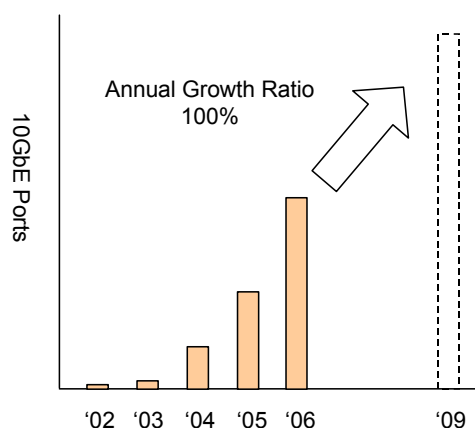



図 2. 10Gbps ポート数遷移

現在各社の 40Gbps 長距離伝送では、信号の On/Off で情報伝達を行う強度変調ではなく、DQPSK(Differential Quadrature Phase Shift Keying)や DP-QPSK といった各種位相変調を適用した開発が行われています。これにより、従来40Gbpsシリアルで実現しようとしていた際に課題となっていたCD, PMD, 非線形性等に大きな改善をもたらすことが期待されています。次項では変調方式とその概念について記載します。

3. 変調方式とその概念

一般的に、光通信の伝送では、NRZ や RZ による強度変調すなわち ASK(Amplitude Shift Keying)という伝送方法が普及しています。最も基本的な NRZ 伝送では、光信号の ON(発光状態) / OFF(消光状態)の変化によって、1/0 の情報を伝達しています。RZ 信号も光信号の ON/OFF の変化によって情報を伝達しますが、RZ 方式では、光信号 ON の発生方法を、パルス幅を NRZ の半分にします。それにより 1bit あたりの平均光パワーが半分になるため、非線形性の影響を減少させることができます。光ファイバには、発光, 消光状態変化すなわちパワーの変化によりファイバ内の屈折率が変化する「非線形性」と呼ばれる特性があります。ON/OFF 時の光パワーの変化が大きくなると、屈折率もより大きく変化し、ファイバ伝達後の光信号波形の歪みを増加させてしまいます。一方、RZ で光の強度を NRZ 時の 2 倍にしても、平均光パワーは NRZ と同様になるため、SNR(信号と雑音の比率)を改善効果が期待できます。

伝送信号を RZ 化することで、平均光パワーを下げて非線形性の影響を減少させるか、光強度を上げて受信側の SNR を改善させるか、を選択することができます。

また、RZ 伝送ではパルス幅を半分にするため、信号内により高い周波数成分を含むことになり、必要とする周波数帯域が広がるという特徴もあります。そのため、DWDM 等の高密度波長多重を行う場合には、波長間の干渉が発生しやすくなる、というデメリットが発生します。

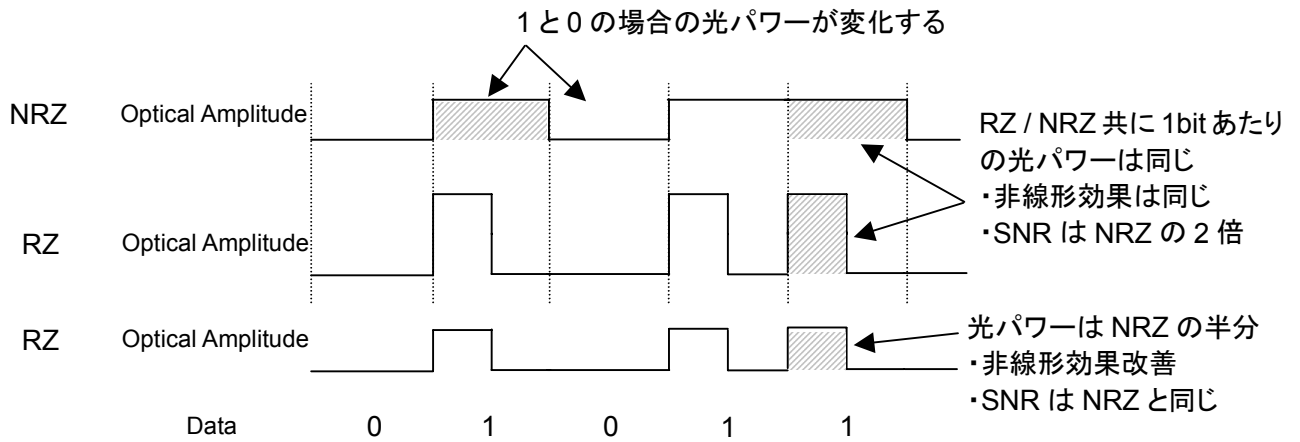



図 3. NRZ と RZ 伝送

非線形性による伝送信号劣化要因を除外する伝送方式として、DPSK や DQPSK のような位相変調(Phase Shift Keying)という方式があります。位相変調では、光の ON/OFF で情報を伝達するのではなく、信号の位相変化に情報を乗せて伝送させるため、光信号は常に発光状態となり、パワーによる屈折率の変化、すなわち非線形性の影響は除外することができます。

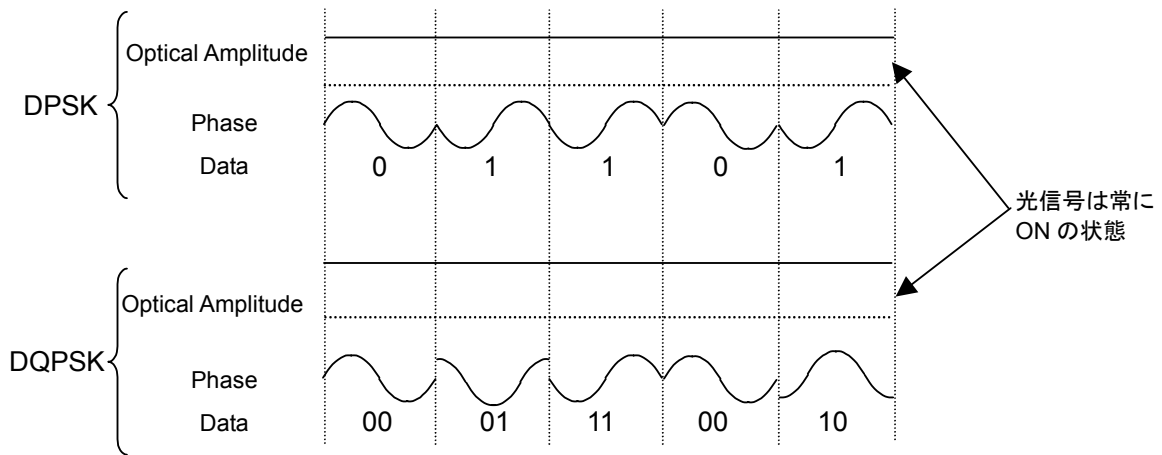



図 4. DPSK と DQPSK 伝送

強度変調と位相変調は、それぞれ以下の方法で行います。

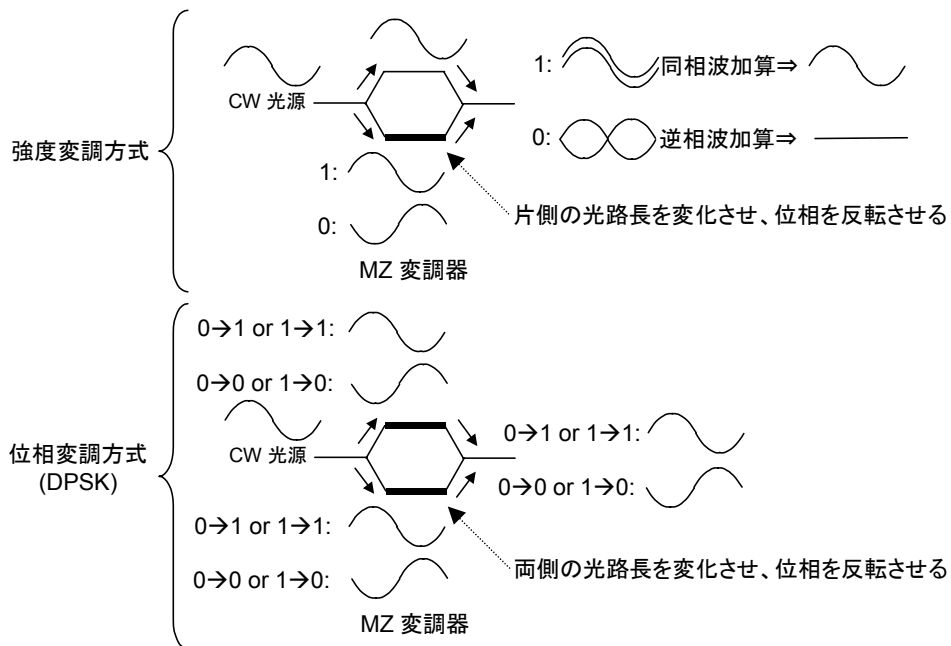



図 5. 強度変調と位相変調(DPSK)伝送

強度変調では、MZ 変調器の片側のみに電圧を印加することで光路長を半周期分変化させ、両方の光路が合波したところで、ON または OFF を表現しています。一方位相変調方式では、MZ 変調器の光路を両方とも変化させることによって出力の位相を反転させています。

DPSK でデータを伝送する場合には、以下のように、伝送したい情報の 0/1 の変化を伝送用のデータにコーディングする必要があります。

伝送されるデータの変化	伝送用データの位相変化
0 → 0 の変化	反転
0 → 1 の変化	非反転
1 → 0 の変化	反転
1 → 1 の変化	非反転

送信側では Pre-Coder を用いてこのコーディングを行い、受信側では 1bit 遅延器が加えられた MZ 変調器でデコードを行い、位相変調を強度変調に変換します。

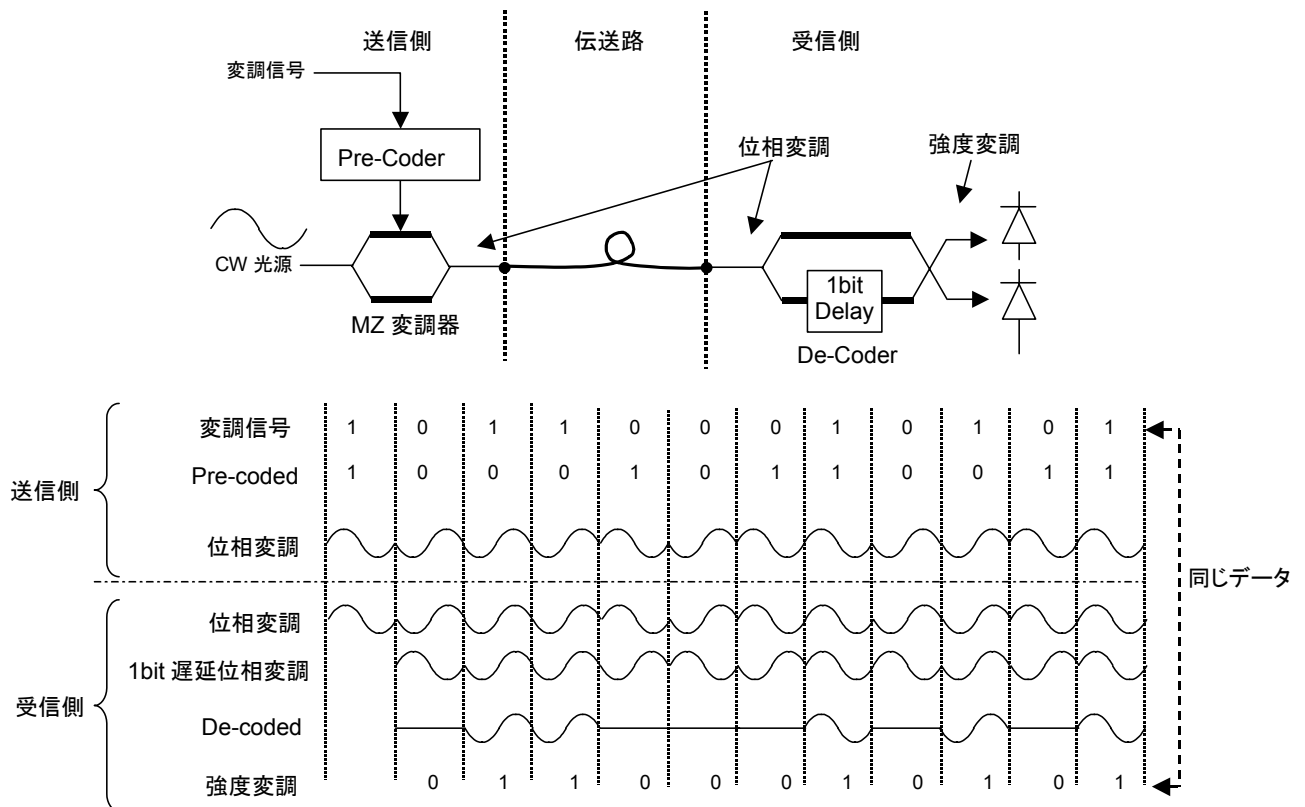



図 6. DPSK 伝送回路とデータの復号化

長距離伝送では、変調によりデータレートを維持しながら、シンボルレートを下げ、波長分散(CD)や偏波分散(PMD)を抑制しつつ長距離化を狙う DQPSK や DP-QPSK 伝送の研究, 開発が活発に行われていることは前述した通りです。

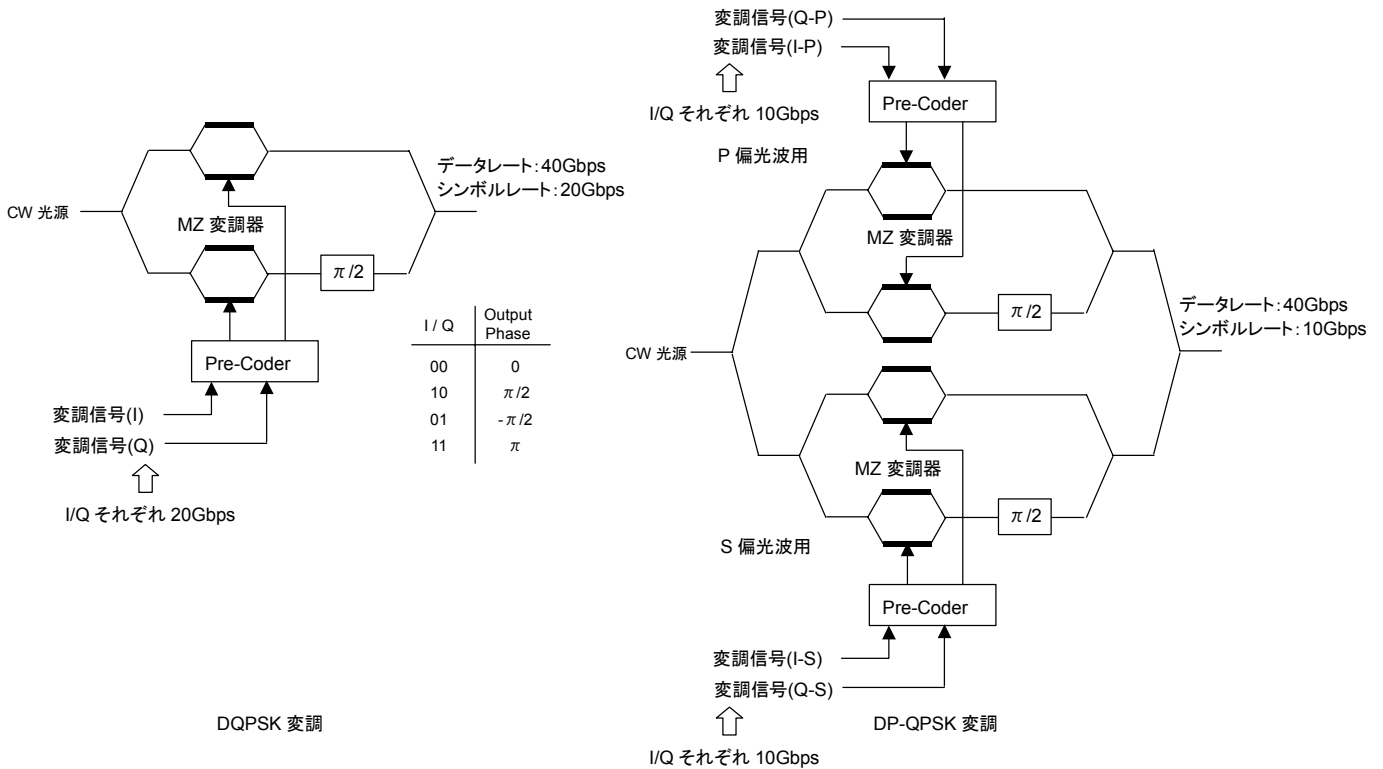



図 7. DQPSK, DP-QPSK 伝送回路

40G の DQPSK では、I と Q、2 系統それぞれ 20Gbps 変調信号を使うことによって、シンボルレートをデータレートの半分に下げます。さらに光の P 偏光波, S 偏光波それぞれに対し I と Q, 2 系統の変調をかけるのが、DP-QPSK です。DP-QPSK では、それぞれの変調信号は 10Gbps の信号を使用します。DPSK よりも DQPSK、さらに DP-QPSK となるにつれ、データレートは一定のまま、シンボルレートを下げるメリットがありますが、反面回路の複雑さが増していくというデメリットがあります。

4. 変調方式および 40GbE/100GbE 規格に対する測定の必要性

4.1 変調方式の測定

前述した回路で、位相変調の伝送実験をするためには、Pre-Coder 論理動作および、位相変調信号の Skew 耐力を確認する必要があります。

まず、Pre-Coder の論理動作について記載します。

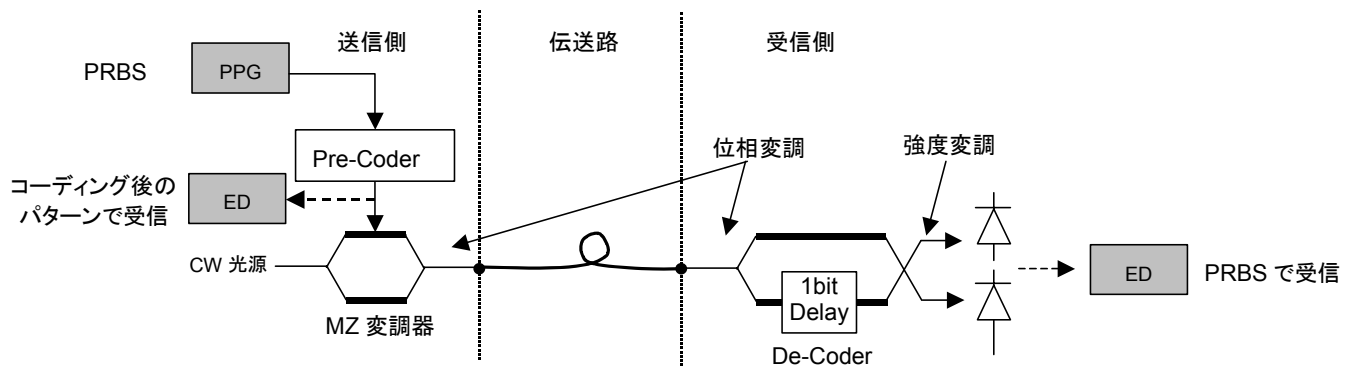



図 8. Pre-Coder 試験系

Pre-Coder 動作は、Pre-Coder 入力に変調信号として PRBS 等の信号を Pattern Generator から入力し、Pre-Coder の出力と想定されるパターンを Error Detector 側の受信パターンとして設定し、BER を測定することで確認することができます。この検証を行うためには、BERTS 機能として、単純な PRBS 発生機能だけでなく、PRBS 信号のパターン長に対応した Pre-Coded 信号を簡易に設定できる自由度の高いユーザプログラマブルパターンか、直接 Pre-Coded 信号を発生、解析できる機能が必要になります。

一般的に、プログラマブルパターンを BERTS に設定する場合には、実際に使用するパターン長とプログラマブル

パターン設定分解能の最小公倍数分の長さが必要になります。例えば、PRBS パターンの長さは 2^n-1bit の長さを持ちます。PRBS 2^{23}-1 の場合、パターン長は 8,388,607bit です。プログラマブルパターン長の設定分解能が 1bit の場合はそのままの長さをパターン長として設定できますが、従来の一般的な BERT では、設定分解能がパターン長によって変化したり、粗かったりすることがあり、このような場合のパターン設定が不便なことがありました。例えば、分解能が 128bit の場合、128 x 8,388,607 bit = 約 1G bit のパターン長が BERTS 側に必要となり、ユーザは、同一パターンを 1bit ずつシフトさせながら、128 回分 BERTS 側に設定していく必要があります。

Anritsu では、この不便さを改善するためパターン長によらず 10Gbit/s 帯 BERT では 1bit 単位, 20Gbit/s 帯 BERT では 2bit 単位, 40Gbit/s 帯 BERT では 4bit 単位で設定できる自由度の高いプログラマブルパターンを持った MP1800 シリーズを提供しています。また、DPSK や ODB, DQPSK に対応した変調信号の生成・解析をプログラムパターンの編集をすることなく自動的に行うソフトウェアオプションもあわせて提供しています。

次に、位相変調信号の Skew 耐力について記載します。

DQPSK、DP-QPSK の試験においては、DPSK で記載した Pre-Coder 試験の他に、I/Q 信号の Skew に対する耐力を試験する必要があります。I/Q 2 系統の変調信号は、2 つで一つの意味を持つ信号であるため、それぞれ独立した信号でありながら、タイミングが同期している必要があります。さらに、この 2 系統の信号の経路長差は、伝送信号の変調誤差となって受信回路に影響を与えます。

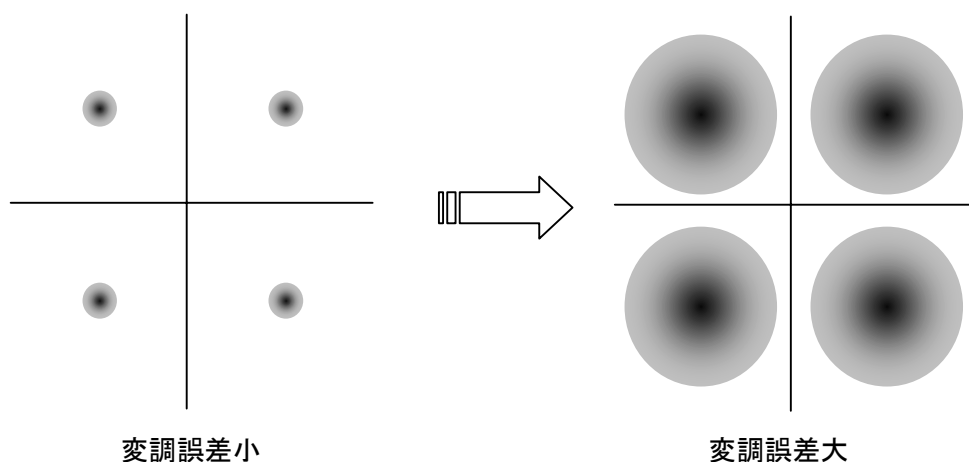



図 9. 変調誤差概念図

10Gbps の信号は 1bit の周期が 100ps であり、信号の経路長として 1bit の長さは、約 2cm となります。つまり、経路長に 1cm の誤差があると 1bit 信号がずれてしまうことになるため、経路長の設計は、厳密に行う必要があります。20Gbps の場合は、1bit の周期は 50ps、経路長約 1cm と半分になるため、さらに厳密な設計精度が要求されます。

以下に、DQPSK, DP-QPSK で必要な変調測定系を示します。

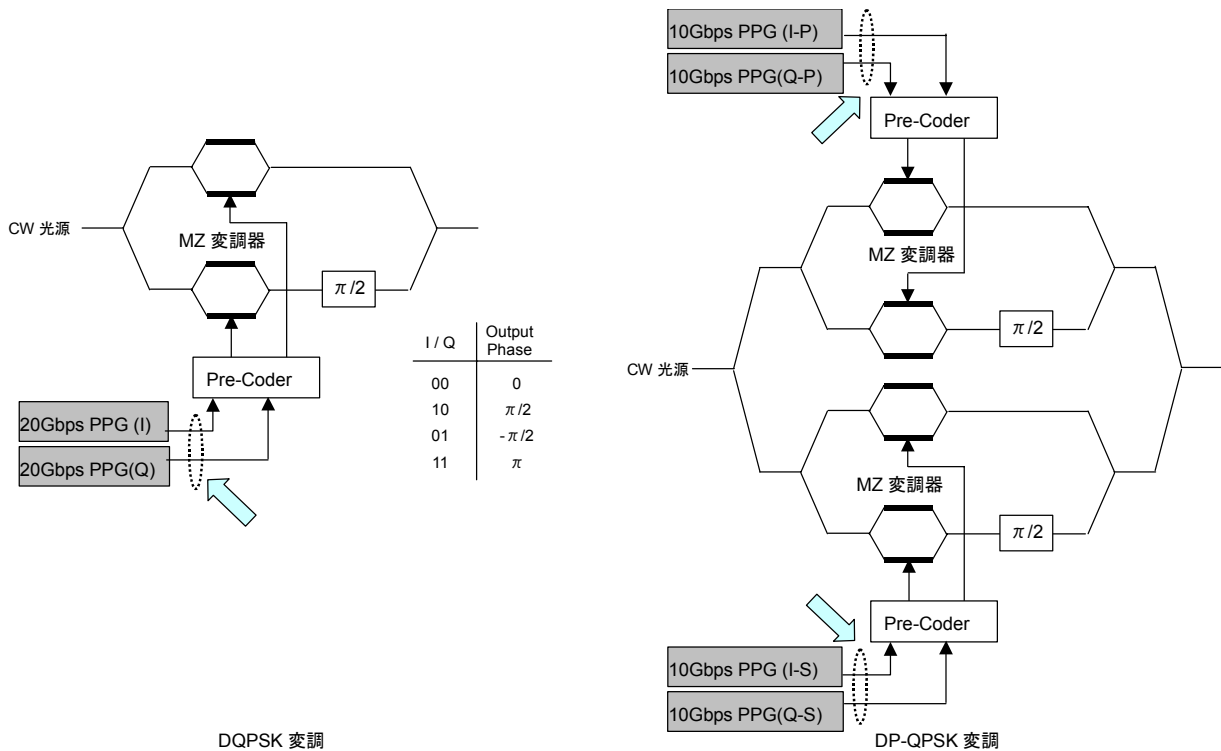



図 10. DQPSK, DP-QPSK 変調信号試験系

図 11 において、点線の〇で囲った I/Q のそれぞれの試験信号は、周波数が同じであるだけでなく、ビットパターン列発生タイミングが同期していることが最低条件になります。さらに、設計上の品質をより確かにするために、I/Q それぞれの信号の発生タイミングをずらすことによって、変調誤差による受信側の耐力を確認しておく必要があります。

4.2 40GbE / 100GbE の測定

ここでは、評価の課題について、PMD, PMA, 装置側のインタフェースである PCS(以前は MLD(Multi Lane Distribution)と呼ばれていました)毎に記載します。

4.2.1 PMD 評価

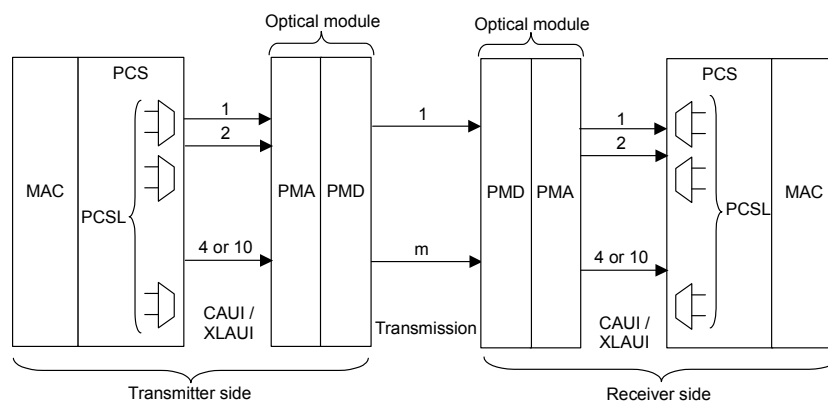



図 11. システム構造(片方向のみ)

100GbE の PMD としては、850nm 10Gbps x 10ch と 1310nm 25.78Gbps x 4λ での実現が活発に議論されています。25.78Gbps x 4λ では、10km 以上の伝送を目標に各社開発を行っています。PMD を評価する場合、測定系の信号源は、PMD 出力波形への影響を与えないようにするために、PMD よりも優れた Tr/Tf, Tj 特性を持つことが求められます。最近の IEEE802.3ba や OIF では、Tr/Tf が 20ps, Tj が 10ps 程度の EML 出力波形が報告されています。

また、一般的に EML は電気入力信号に対する消光特性が非線形であることから、電気入力信号の Cross point を 50%にすると、光出力波形の Cross point が 0 側にずれ、波形が歪んでしまう傾向があります。そのため、EML 評価用の信号源としては、最適な光出力波形を得るために Cross point 可変機能が必須になります。

4.2.2 PMA 評価

PMD と装置側を接続する SERDES 機能として PMA が定義されています。40GbE で使用される 4:1 SERDES および 100GbE で使用される 10:4 SERDES は、Lane 数および Bit Rate を変換する機能を持つことから Gear Box とも呼ばれています。ここでは PMD の評価課題について記載します。Multi Lane 間の伝送を行う場合に最も重要な課題と考えられるのが、Lane 間のスキュー評価です。Skew は、伝送路の伝播遅延, ファイバ長, PCB 上のパターン長, ケーブル長, IC の伝播遅延時間等様々な要因によって発生します。Multi Lane 間の Skew を調整する機能としては、40Gbps トランスポンダの電気側インタフェースとして OIF で規定されている SFI-5P1 や SFI5-P2 等で使用される DeSkew 機能があります。SFI-5 では Skew を調整するために、DeSkew 呼ばれる特別な Lane をデータ Lane に並走させていましたが、40GbE 用の 10Gbps 4Lane 側(XLAUI)や 100GbE 用の 10Gbps 10Lane 側(CAUI)では DeSkew のような特別な Lane を設けずに、Skew 調整用の”アライメントマーカ”と呼ばれるデータをレーン内に埋め込む手法が採用されます。

100GbE では、CAUI の 10 レーンの信号は、さらに装置内部で電気的インタフェースを持たない論理的な 20 の PCSL(Physical Coding Sub-layer Lane)に分割されます。20 というのは、100GbE の伝送ライン数が 1, 2, 4, 5, 10 等様々な形態を採る可能性があり、その場合の装置側処理を同一のものに統一するため最小公倍数から決められています。アライメントマーカは、この PCSL 上で 66 ビットブロックが 16384 回発生するごとに送信され、各レーンデータの特定とスキューのアライメントのために使用されます。

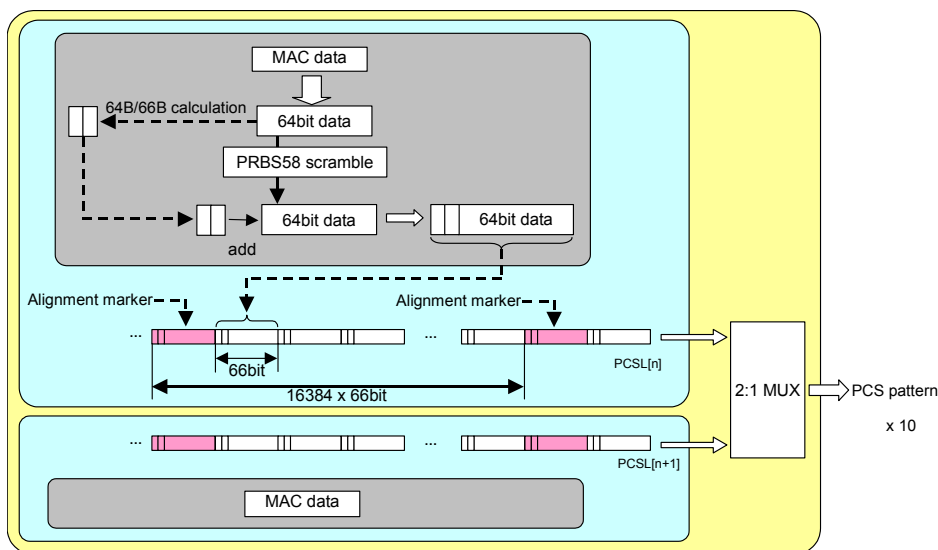



図 12. アライメントマーカ発生概念図

アライメントマーカにはスクランブルをかけないため、DC バランスを保つ必要があります。そのため、はじめの 2 ビットは”01”それに続く 32 ビットは PRBS58 段から生成された数列、そして続く 32bit は、前の 32bit の反転ビットとして DC バランスを保っています。

PCSL Bit Number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
59 – 66	˜F4	˜17	˜B0	˜10	˜0B	˜50	˜15	˜FA	˜DF	˜38	˜DE	˜B8	˜CD	˜AB	˜B5	˜EB	˜30	˜35	˜6F	˜E9
51 – 58	˜21	˜8E	˜E8	˜7B	˜09	˜C2	˜26	˜66	˜76	˜FB	˜99	˜55	˜B2	˜BD	˜CA	˜CD	˜4C	˜B7	˜2A	˜E5
43 – 50	˜68	˜71	˜4B	˜95	˜07	˜14	˜4A	˜45	˜24	˜C9	˜6C	˜91	˜B9	˜F8	˜C7	˜36	˜31	˜D6	˜66	˜F0
35 – 42	˜C1	˜9D	˜59	˜4D	˜F5	˜DD	˜9A	˜7B	˜A0	˜68	˜FD	˜B9	˜5C	˜1A	˜83	˜35	˜C4	˜AD	˜5F	˜C0
27 – 34	F4	17	B0	10	0B	50	15	FA	DF	38	DE	B8	CD	AB	B5	EB	30	35	6F	E9
19 – 26	21	8E	E8	7B	9	C2	26	66	76	FB	99	55	B2	BD	CA	CD	4C	B7	2A	E5
11 – 18	68	71	4B	95	7	14	4A	45	24	C9	6C	91	B9	F8	C7	36	31	D6	66	F0
3 – 10	C1	9D	59	4D	F5	DD	9A	7B	A0	68	FD	B9	5C	1A	83	35	C4	AD	5F	C0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図 13. 100GbE アライメントマーカ

100GbE 10:4 の PMA では、以下のような順列で MUX/DEMUX されます。

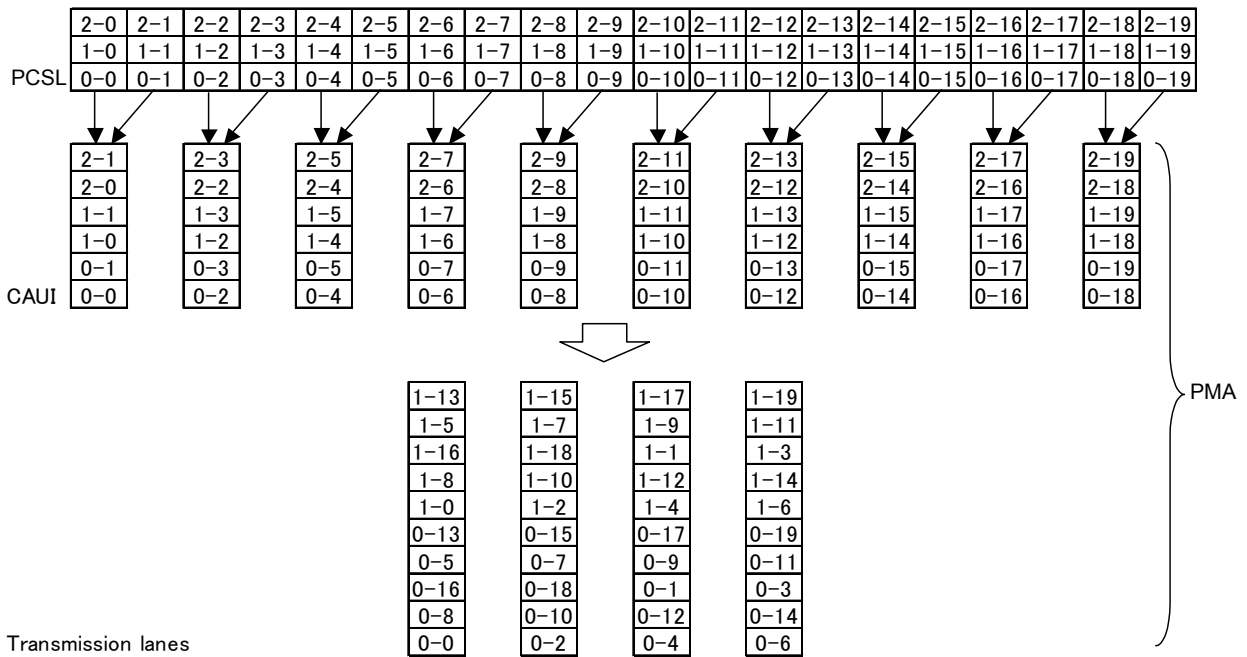



図 14. ビットシーケンス

CAUI は 10G x 10 レーンで、PMA と PCS を接続する物理的電気インタフェースです。CAUI は PMA で 25G x 4 レーンに MUX され、PMD を経由して伝送路へと送信されます。受信側はその逆になります。

100GbE では、ビットスキューが発生する場所により、後段に当該ビットが現れるレーンが変化していきます。例えば、最も揺らぎが発生しやすい伝送路でビットスキューが発生した場合、スキューは、CAUI レーン上で 4 x n ビットのずれとなって現れます。

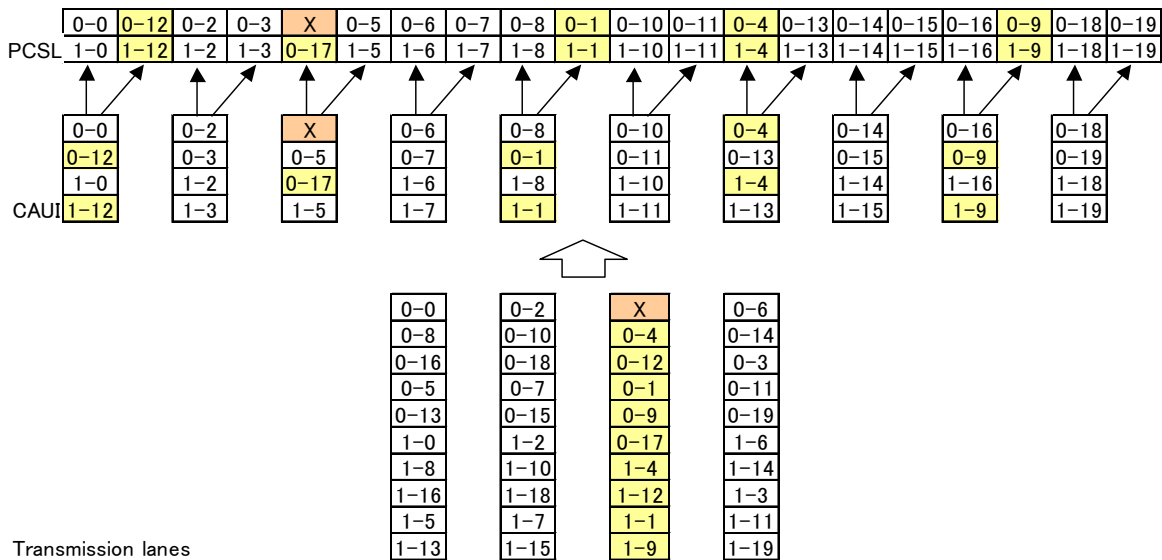



図 15. 伝送レーン側から装置側へのスキュー

一方、PMA が実装される光モジュール上の PCB トレース長の差や、バッファの伝播遅延時間の差等により CAUI 上で伝送レーン側に向かってスキューが発生した場合には、下記のようになります。

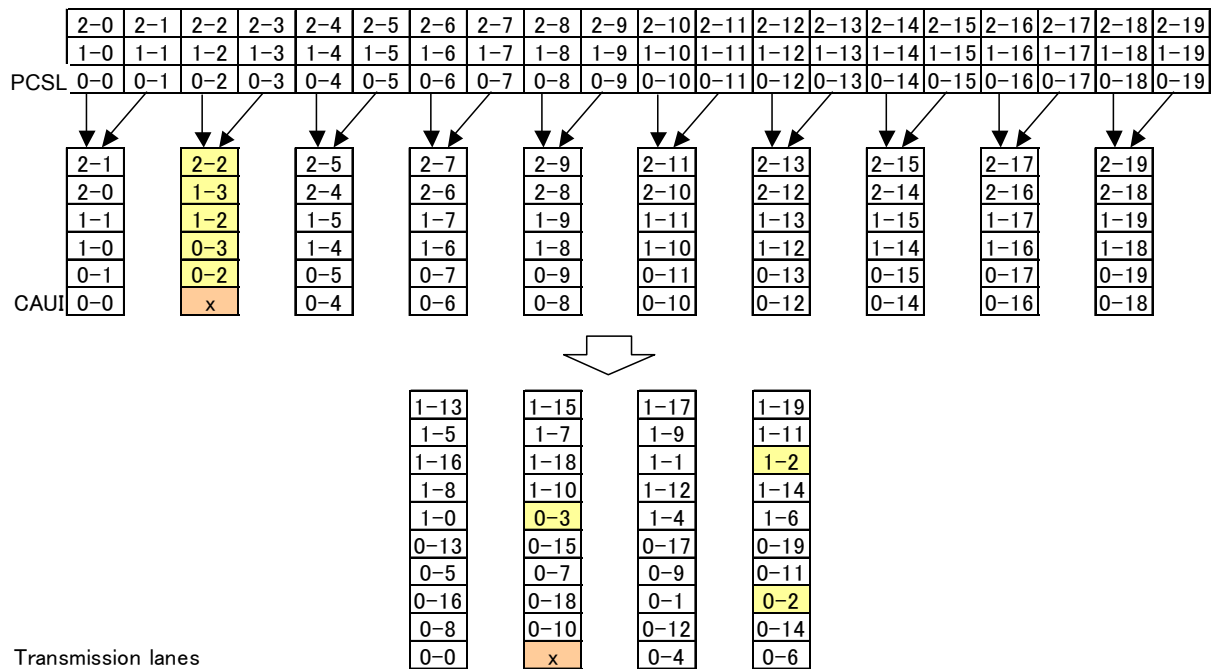



図 16. 装置側から伝送レーン側へのスキュー

PMA 上には、伝送路で発生する揺らぎを吸収する目的の FIFO は実装されますが、スキュー自体を補正する機能は実装されません。そのため、PMA の試験としては、スキューの吸収を目的として試験するのではなく、論理的にビット幅の変換ができているかどうかを確認する以下の試験が必要になります。

ここで重要なことは、10:4 のどちら側から試験をするにしても、10 レーンや 4 レーンの独立した Pattern Generator である必要はないということです。これは測定コストを下げることができる重要なテクニックです。すなわち、10 レーン側から入力するにしても、4 レーン側から入力するにしても、入力するタイミングが既知であれば出力されるパターンも既知になります。そのため、本測定に必要な測定器の条件としては、複数 PPG のビットパターン発生タイミングを制御できることが必須の要件になります。複数PPG のビットパターン発生タイミングが不定の場合、正しくビット幅の変換ができているかどうかを確認することはできません。以下に推奨する測定系を示します。

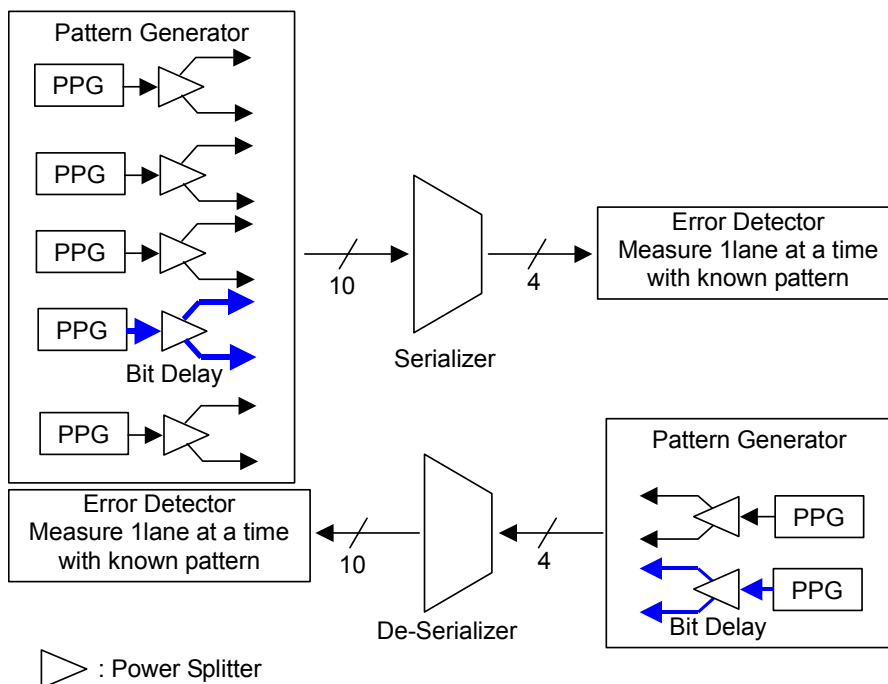



図 17. PMA スキュー試験系

4.2.3 PCS 評価

装置側インタフェースである PCS を評価する場合には、図 15 伝送レーン側から装置側へのスキューで示したように、Transmission 側4レーン中の1レーンにスキューが生じた場合、PCSL の5レーンに影響が及ぶことを考慮して、以下のような試験系が考えられます。

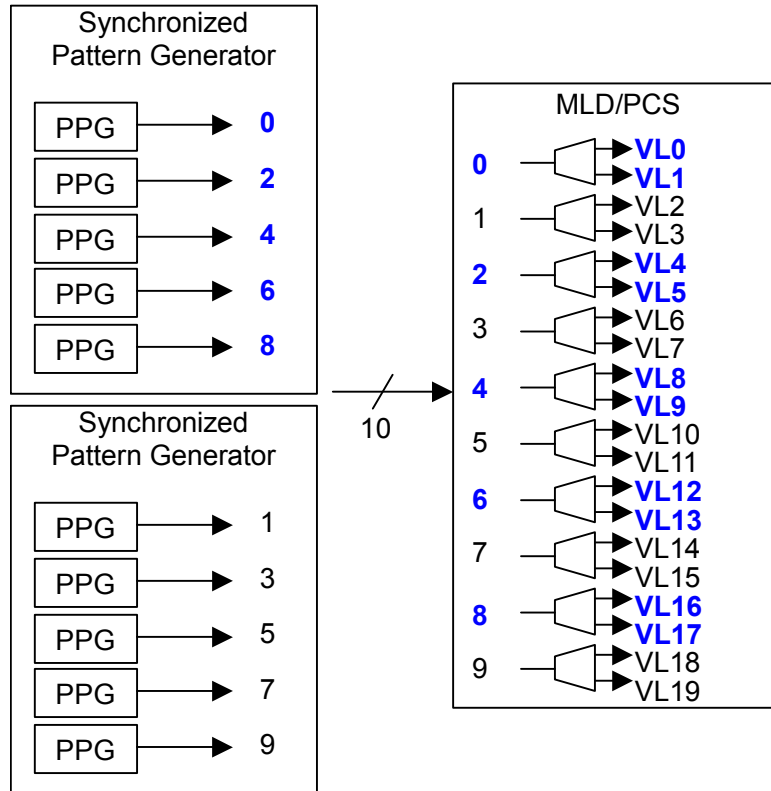



図 18. PCS スキュー試験系

PPG に設定するのは、CAUI の1レーンで発生したスキューをエミュレートした奇数または偶数のアライメントワードを含む PCS パターンです。またここで必要となる要件は5つの PPG のパターン発生タイミングが同期していることです。例えば、図 15 に示す 伝送レーン側から装置側へのスキューの CAUI レーンの左から 1 レーン毎のパターンを PCS に入力することで、該当する PCSL のスキューアライメント機能を確認することができます。

5. まとめ

本稿では、最近の 40G 長距離伝送や 100GbE 等、超高速伝送技術動向について解説するとともに、そこで求められる評価課題と試験系について測定器メーカの立場から、記載しました。

アンリツは今後も、お客様の製品品質を高めるために、より良い測定方法を提案していきます。

■参考文献

http://grouper.ieee.org/groups/802/3/hssg/index.html
IEEE802.3ba HSSG Tutorial_1107.pdf
IEEE802.3ba 40/100G Architecture and Interfaces proposal
IEEE802.3ba BaselineSummary_0508
IEEE P802.3ba /D1.1
IEEE Applications & Practice November 2007
OIF 2008.125.04
ITU-T Study Group15 TD337(GEN/15)

お見積り、ご注文、修理などのお問い合わせは下記まで。記載事項はおことわりなしに変更することがあります。

アンリツ株式会社

http://www.anritsu.co.jp

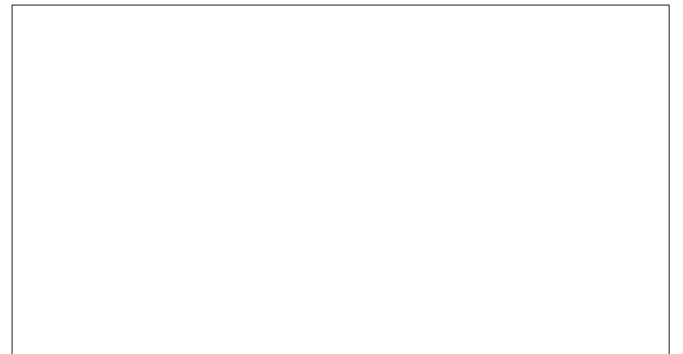
本　　社	TEL046-223-1111	〒243-8555	神奈川県厚木市恩名5-1-1
営業第1本部			
第1営業部	046-296-1202	243-0016	神奈川県厚木市田村町8-5
第2営業部	046-296-1202	243-0016	神奈川県厚木市田村町8-5
第3営業部	046-296-1203	243-0016	神奈川県厚木市田村町8-5
第4営業部	03-5320-3560	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
第5営業部	03-5320-3567	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
営業第2本部			
第1営業部	046-296-1205	243-0016	神奈川県厚木市田村町8-5
第2営業部	03-5320-3551	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
北海道支店	011-231-6228	060-0042	札幌市中央区大通西5-8 昭和ビル
東北支店	022-266-6131	980-0811	仙台市青葉区一番町2-3-20 第3日本オフィスビル
関東支社	048-600-5651	330-0081	さいたま市中央区新都心4-1 FSKビル
東関東支店	029-825-2800	300-0034	土浦市港町1-7-23 ホープビル1号館
千葉営業所	043-351-8151	261-0023	千葉市美浜区中瀬1-7-1 住友ケミカルエンジニアリングセンタービル
新潟支店	025-243-4777	950-0916	新潟市中央区米山3-1-63 マルヤマビル
東京支店(官公庁担当)	03-5320-3559	160-0023	東京都新宿区西新宿6-14-1 新宿グリーンタワービル
中部支社	052-582-7281	450-0002	名古屋市中村区名駅3-8-7 ダイアビル名駅
関西支社	06-6391-0111	532-0003	大阪市淀川区宮原4-1-14 住友生命新大阪北ビル
東大阪支店	06-6787-6677	577-0066	東大阪市高井田本通7-7-19 昌利ビル
中国支店	082-263-8501	732-0052	広島市東区光町1-10-19 日本生命光町ビル
四国支店	087-861-3162	760-0055	高松市観光通2-2-15 第2ダイヤビル
九州支店	092-471-7655	812-0016	福岡市博多区博多駅南1-3-11 KDX博多南ビル

再生紙を使用しています。

計測器の使用方法､その他についてのお問い合わせは下記まで。

計測サポートセンター

TEL: 0120-827-221、FAX: 0120-542-425
受付時間／ 9：00～17：00、月～金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

● ご使用の前に取扱説明書をよくお読みの上、正しくお使いください。　0804

■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

No. MP1800A-40/100GbE-J-E-1-(2.00) 2009-3 PSD